

Kontrak Nomor : III/LPPM/2013-03/21-P

LAPORAN PENELITIAN

**Studi Experimental Pengaruh Pengaku
Miring Pada Tekuk Torsi Lateral Balok I**



Disusun oleh

Dr. Paulus Karta Wijaya

Helmi Hermawan, ST,MT.

Victor

**Universitas Katolik Parahyangan
Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil
2013**

DAFTAR ISI

Abstrak	3
Bab 1 Pendahuluan	4
Bab 2 Tinjauan Pustaka	7
Bab 3 Metode Penelitian	13
Bab 4 Uji Eksperimental	17
Bab 5 Kesimpulan	36
Daftar Pustaka	37
Lampiran	38

ABSTRAK

Kemampuan baja memikul beban biasa ditentukan berdasarkan kekuatan dan stabilitas. Kekuatan artinya material baja mencapai kekuatan, yaitu tercapainya tegangan leleh sepenuhnya pada seluruh penampang, yaitu tercapainya momen plastis penampang. Masalah stabilitas pada balok baja adalah masalah tekuk torsi lateral. Adanya masalah stabilitas, membuat kemampuan baja memikul beban menjadi lebih kecil dari kekuatan materialnya, yaitu momen plastis tidak dapat tercapai. Balok hanya dapat memikul momen sebesar momen kritis. Maka orang selalu mengupayakan agar masalah stabilitas dikurangi pengaruhnya, yaitu momen kritis sebesar mungkin. Biasanya hal ini dilakukan dengan memasang tumpuan lateral pada balok. Tetapi bila memasang tumpuan lateral ini tidak dimungkinkan perlu diupayakan cara lain meningkatkan momen kritis. Dalam penelitian ini, dipelajari pengaruh pengaku yang dipasang miring terhadap besarnya momen kritis. Penelitian dilakukan dengan metode experimental. Dari pengujian ini dapat disimpulkan bahwa ada peningkatan beban kritis akibat adanya pengaku miring dan peningkatan hasil eksperimental kurang lebih adalah lima puluh persen dari hasil analisis dengan metode elemen hingga.

BAB I PENDAHULUAN

1. Latar belakang penelitian

Tekuk torsi lateral adalah salah satu limite state dalam perancangan balok baja. Tekuk torsi lateral adalah gejala dimana suatu balok bila dibebani transversal. Pada saat beban kecil, balok dalam keadaan seimbang stabil. Artinya bila balok diberi gangguan kecil, balok tetap dalam konfigurasi semula. Bila beban cukup besar, balok dapat berada dalam keseimbangan tidak stabil. Yaitu bila balok diberi gangguan maka balok tidak dapat kembali pada konfigurasi semula, namun terus mengalami perpindahan lateral yang disertai puntir. Ada satu beban tertentu yang menjadi batas antara beban stabil dan beban labil. Biasanya beban batas tersebut dinyatakan dalam besaran momen lentur kritis.

Pada dasarnya, terjadinya tekuk torsi lateral, tidak disukai karena besarnya momen kritis adalah lebih kecil dari momen plastis sehingga dengan demikian tekuk torsi lateral membuat balok tidak dapat mencapai kekuatan maksimumnya. Dengan demikian tekuk torsi lateral merugikan.

Besarnya momen kritis pada balok akibat beban momen merata (uniform) telah diselesaikan secara analitikal oleh Timoshenko (Timoshenko, 19..) dan didapatkan besarnya momen kritis sebagai berikut,

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} \sqrt{EI_y \left(GJ + \frac{EC_w \pi^2}{L^2} \right)} \quad 1$$

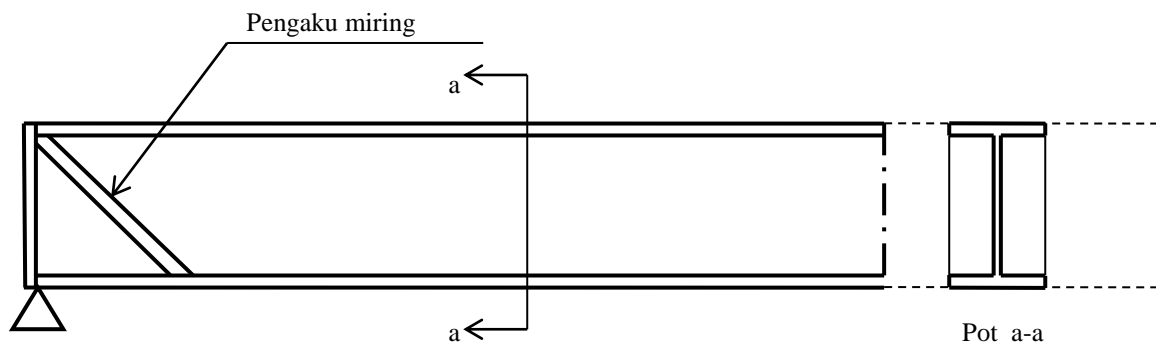
Momen kritis menurut persamaan 1.1 diturunkan berdasarkan anggapan sebagai berikut:

1. Material elastic, homogen dan isotropis.
2. Balok prismatic
3. Ujung balok ditumpu sederhana
4. Rotasi pada ujung balok ditahan, tetapi warping tidak ditahan.

Persamaan 1 tersebut telah digunakan dalam perancangan balok dan diadopsi ke dalam peraturan perancangan struktur baja Amerika Serikat yaitu AISC-2010.

Dari persamaan 1 dapat dilihat bahwa momen kritis berbanding terbalik terhadap panjang. Makin panjang balok, makin kecil momen kritis. Makin pendek balok, makin besar momen kritis. Oleh karena itu, biasanya untuk meningkatkan momen kritis, dipasang tumpuan lateral pada flens tertekan sehingga panjang L pada persamaan 1 diisi jarak antara dua tumpuan lateral (unbraced length).

Tetapi bilamana pemasangan tumpuan lateral tidak dapat dilakukan, maka dapat dilakukan usaha lain untuk meningkatkan momen kritis. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah dipasang pengaku miring pada web seperti diilustrasikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Balok dengan pengaku miring

Pengaku miring tersebut dilas pada web maupun flens dengan las sudut. Untuk memperlihatkan seberapa jauh peningkatan momen kritis akibat adanya pengaku miring, telah dilakukan penelitian pendahuluan dengan metode elemen hingga seperti akan diuraikan dalam Bab 2.

3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah

1. Melakukan verifikasi eksperimental atas hasil studi metode elemen hingga, sehingga hasil studi dengan metode elemen hingga dapat diterapkan dengan meyakinkan.
2. Mendapatkan data untuk kondisi dimana tekuk torsi lateral terjadi dalam rentang inelastic. Untuk rentang tekuk torsi lateral inelastic belum dapat dihitung secara elemen hingga sehingga mengandalkan data eksperimental.

4 Ruang lingkup

Penelitian ini mempunyai ruang lingkup sebagai berikut.

1. Balok adalah balok baja dengan penampang I
2. Balok terletak diatas sendi dan rol
3. Tekuk torsi lateral mencakup tekuk elastic dan tekuk inelastic.

5 Kontribusi pada ilmu pengetahuan

Kontribusi pada ilmu pengetahuan dan ilmu teknik adalah dimengertinya gejala penguatan stabilitas balok akibat adanya pengaku miring dan persamaan untuk memprediksi besarnya peningkatan tersebut.

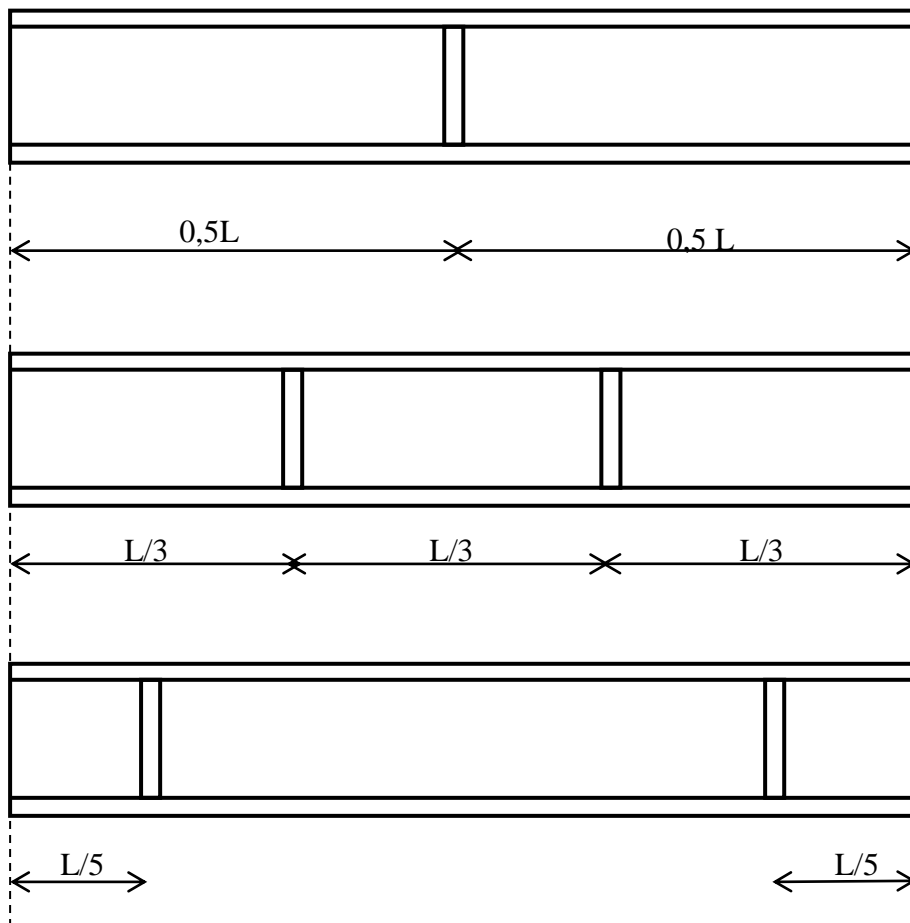
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi terdahulu

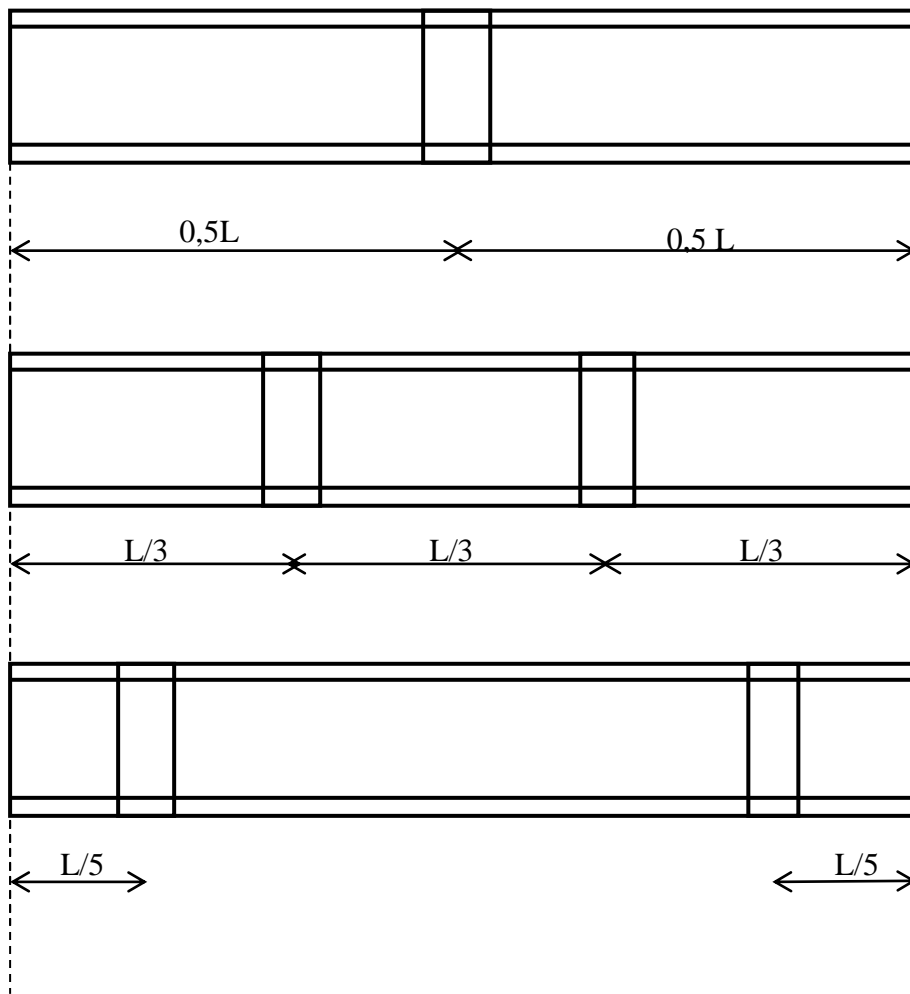
Masalah stabilitas balok, walaupun telah dipelajari cukup lama, sampai hari ini masih menarik minat para peneliti. Namun demikian, diantara publikasi tentang stabilitas balok, belum ada studi yang membahas pengaruh pengaku miring terhadap besarnya momen kritis. Kasus kasus lain banyak diteliti. Antara lain Miller (2003) mempelajari perilaku dan limit state pada stabilitas balok *web tapered*. Raftoyanis (2010) mempelajari tekuk torsi lateral balok nonprismatis (*web tapered*) dengan menggunakan metode energy. Park et al (2004) mempelajari besarnya momen kritis pada balok non prismatic yang berbentuk stepped beam akibat momen tidak uniform. Sapalas et al mempelajari tekuk torsi lateral elastic balok web tapered dengan menggunakan metode elemen hingga.

Satu satunya penelitian tentang pengaruh pengaku terhadap tekuk torsi lateral dilakukan oleh Takabatake et al (Takabatake, 1991). Tetapi pengaku yang digunakan adalah pengaku web vertical dan *batten plates*. Pengaku web vertical yang diteliti oleh Takabatake ditunjukkan dalam Gambar 2.1. sedangkan pengaku batten plates ditunjukkan dalam Gambar 2.2. Pengaku tersebut ditempatkan pada tiga macam posisi. Pertama, satu pengaku di tengah bentang. Kedua, dua pengaku masing masing pada jarak $L/3$ dari ujung. Ketiga, dua pengaku ditempatkan pada jarak $L/5$ pada kedua ujung.

Penelitian tentang pengaku web miring, sejauh yang dapat disurvey belum ada yang melakukannya. Oleh karena itu penelitian ini merupakan topic yang baru dan orisinal.



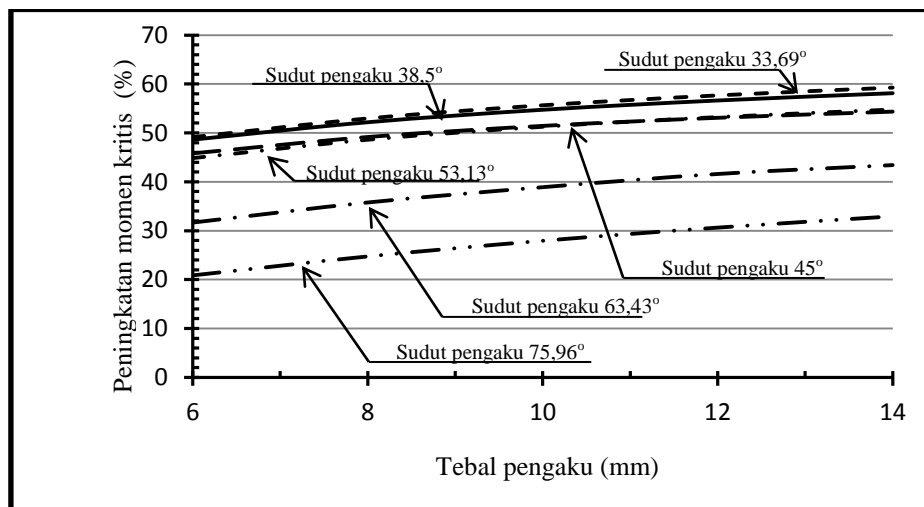
Gambar 2.1 Pengaku web vertikal dalam penelitian Takabatake



Gambar 2.2 Pengaku *batten plates* dalam penelitian Takabatake

2.2 Studi pendahuluan

Untuk mempelajari pengaruh pengaku miring, telah dilakukan studi pendahuluan dengan menggunakan metode elemen hingga yang dibantu dengan program SAP2000. Selanjutnya dilakukan analisis metode elemen hingga untuk balok dengan pengaku miring pada kedua ujungnya. Parameter yang divariasikan yaitu kemiringan pengaku dan tebal pengaku. Sudut kemiringan pengaku diukur terhadap garis horizontal. Momen kritis hasil metode elemen hingga dibandingkan dengan momen kritis eksak untuk balok tanpa pengaku menunjukkan peningkatan yang signifikan. Prosentase peningkatan momen kritis disajikan dalam Gambar 3.

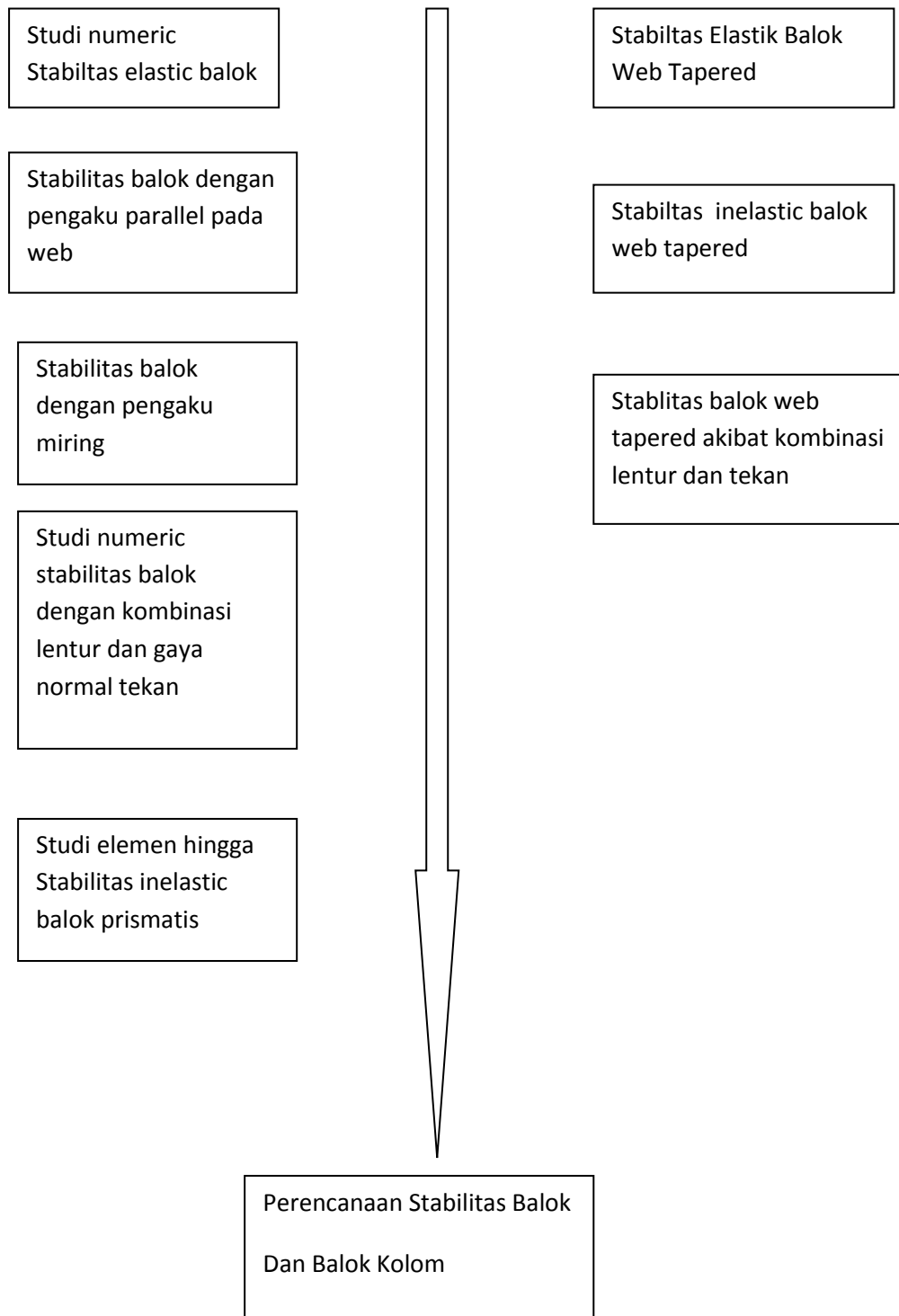


Gambar 3 Grafik peningkatan momen kritis akibat adanya pengaku

Dapat dilihat bahwa sudut kemiringan pengaku berpengaruh sangat signifikan. Namun selawat sudut 45° , peningkatan lebih lanjut tidak signifikan. Maka penelitian ini akan menggunakan kemiringan sudut 45° . Pengaruh ketebalan dalam satu kemiringan tidak sangat signifikan walaupun ada peningkatan. Penelitian ini akan menggunakan dua macam ketebalan yaitu 6 mm dan 10 mm.

Studi dengan menggunakan metode elemen hingga, terbatas pada tekuk elastis. Untuk tekuk inelastic hanya akan diteliti dengan menggunakan uji eksperimental. Oleh karena itu pengujian untuk tekuk inelastis akan menggunakan benda uji yang lebih banyak.

Road map penelitian



Studi stabilitas balok web tapered telah dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dan telah dipublikasikan pada konferensi internasional EACEF2011 (Wijaya 2011)

Studi stabilitas elastic balok telah dilakukan dengan menggunakan dana LPPM Unpar dan telah dipublikasikan pada konferensi ICCER-2012 (Wijaya, 2012).

Studi stabilitas elastic dengan pengaku parallel pada web balok telah dilakukan dengan metode elemen hingga dan dipublikasikan pada ICCER-2012 (Wijaya,2012).

Penelitian yang telah dilakukan diatas adalah untuk tekuk torsi lateral elastic. Untuk tekuk torsi lateral inelastic masih perlu dilakukan uji eksperimental.

Dalam penelitian ini studi tentang tekuk torsi lateral balok dengan pengaku miring dilakukan untuk tekuk torsi lateral elastic dan inelastic.

BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental yang didukung dengan metode elemen hingga.

Pengujian dilakukan di laboratorium struktur unpar. Alat alat yang digunakan adalah Universal Testing Machine, LVDT dan strainages dan data logger.

Benda Uji

Benda uji dibuat dari balok baja dengan penampang I.

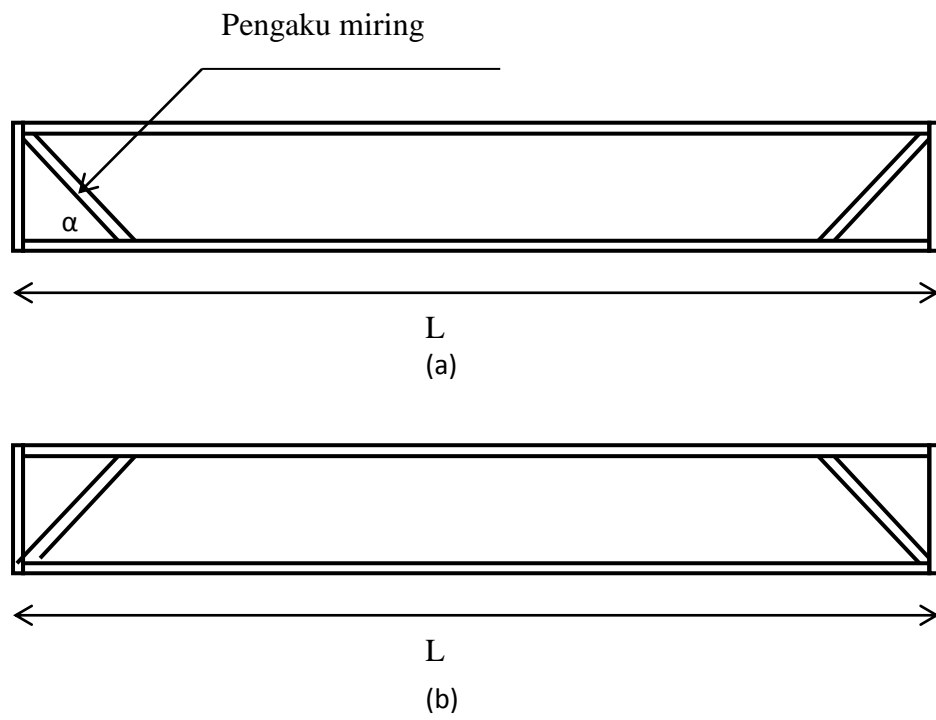
Bentuk benda uji adalah seperti Gambar 3.1. Ada dua alternative pemasangan pengaku miring.

Kedua ujung ditumpu sendi, rotasi puntir ditahan tetapi warping tidak ditahan.

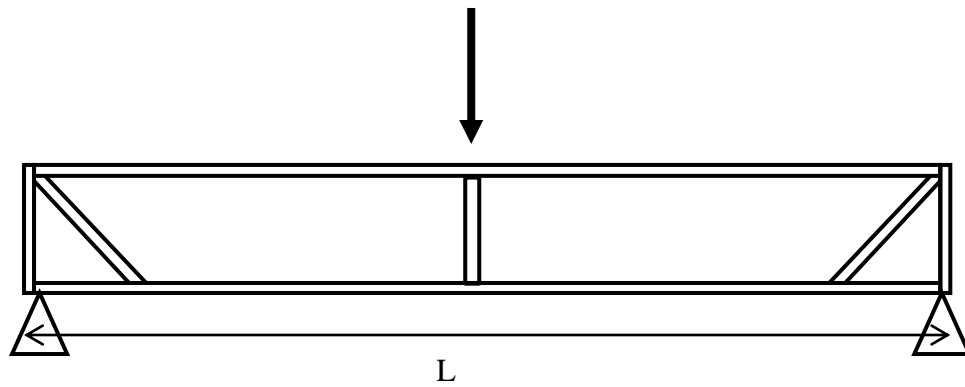
Digunakan profil WF15075x5x7.

Penampang baja tersebut merupakan penampang yang kompak.

Untuk WF150x75x5x7, panjang batas terjadinya tekuk torsi lateral adalah $L_p = 84,7 \text{ cm}$ dan panjang batas terjadinya tekuk torsi lateral elastik adalah $L_r = 318,5 \text{ cm}$



Gambar 3.1 Bentuk benda uji : (a) alternatif 1 dan (b) alternative 2



Gambar 3.2. Skema pembebanan benda uji

Pembebanan dilakukan dengan memberikan beban terpusat ditengah bentang secara displacement control. LVDT dipasang ditengah bentang diarah vertical dan lateral.

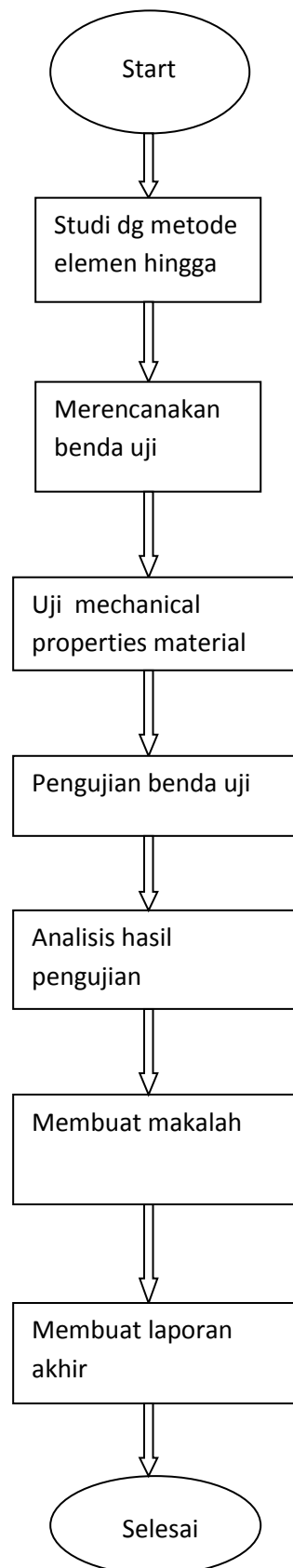
Sebelum pengujian benda uji dilakukan pengujian mechanical properties yaitu untuk mengetahui modulus elastisitas, rasio poisson, tegangan leleh dan kuat tarik baja.

Dibuat 8 benda uji seperti disajikan pada Tabel 1

Tabel 1 : Jenis benda uji

WF	Panjang (cm)	Pengaku	Tebal pengaku (mm)
WF150x75	380	Tanpa pengaku	5
WF150x75	380	Pengaku 1:1	5
WF150x75	380	Pengaku 1:2	5
WF150x75	380	Pengaku 2:1	5
WF150x75	280	Tanpa pengaku	5
WF150x75	280	Pengaku 1:2	5
WF150x75	280	Pengaku 2:1	5
WF150x75	280	Pengaku 2:1	5

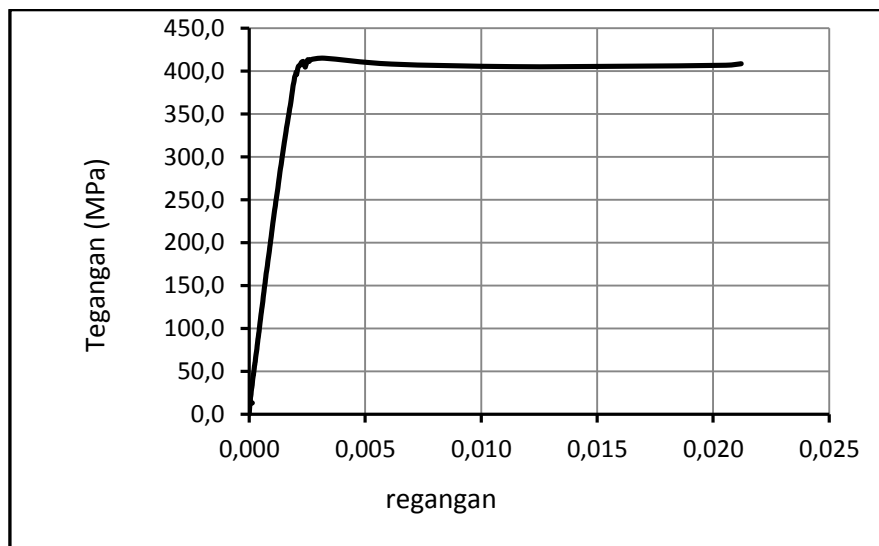
Diagram alir penelitian



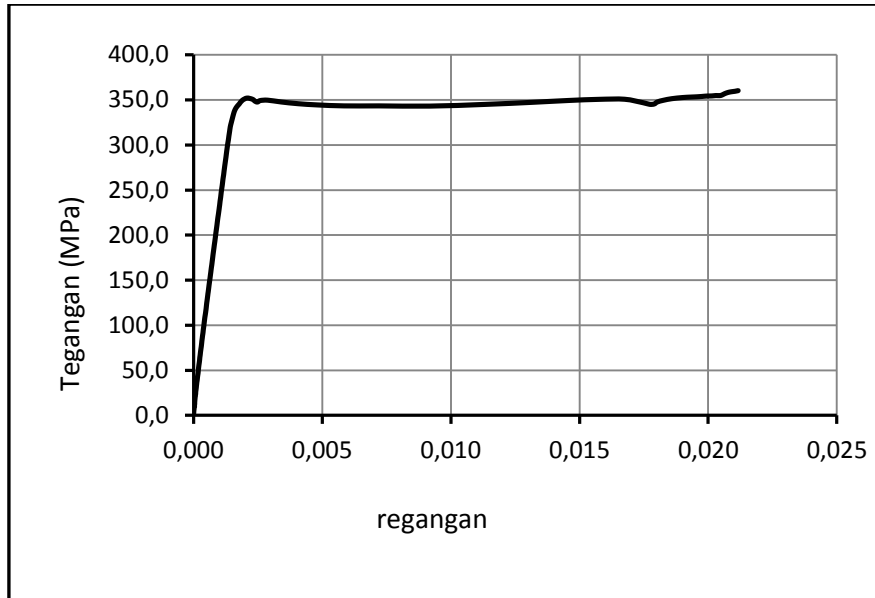
BAB IV UJI EKSPERIMENTAL

4.1 Pengujian spesimen baja

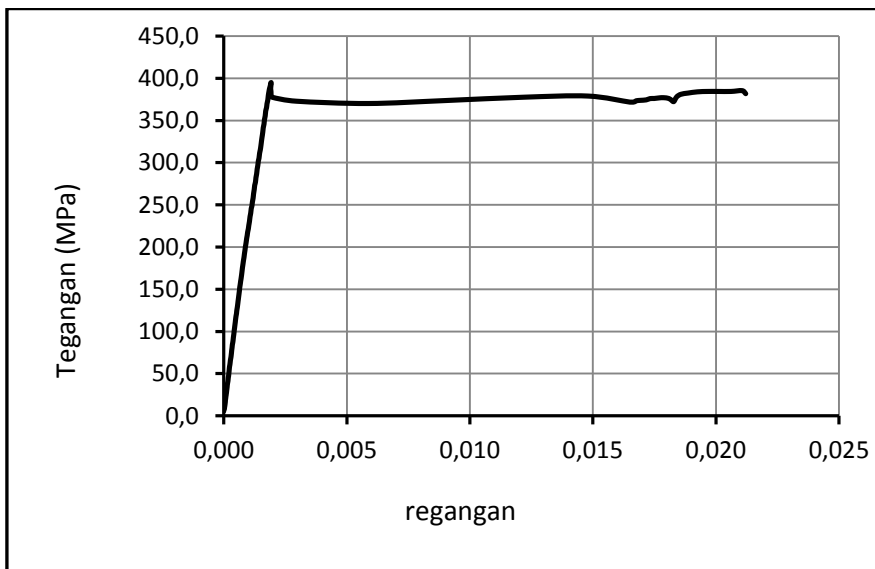
Sebelum melakukan pengujian balok, terlebih dahulu dilakukan pengujian spesimen baja untuk mengetahui besarnya modulus elastisitas, tegangan leleh dan kuat tarik material baja yang digunakan. Untuk modulus elastisitas digunakan strain-gage agar dapat direkam besarnya regangan yang terjadi. Selain itu dari UTM juga didapat data berupa gaya dan perpindahan. Dari data UTM didapat kurva tegangan – perpindahan. Ada enam buah spesimen yang diujikan yang diberi nama spesimen A1, spesimen A2, spesimen A3, spesimen B1, spesimen B2 dan spesimen B3. Spesimen tersebut diambil dari profil baja yang digunakan untuk membuat benda uji balok. Hasil dari pengujian spesimen disajikan dalam bentuk kurva tegangan regangan pada Gambar 4.1 sampai dengan Gambar 4.12. Dari pengujian ini didapat nilai modulus elastisitas, tegangan leleh dan kuat tarik sebagaimana disajikan dalam Tabel 4.1



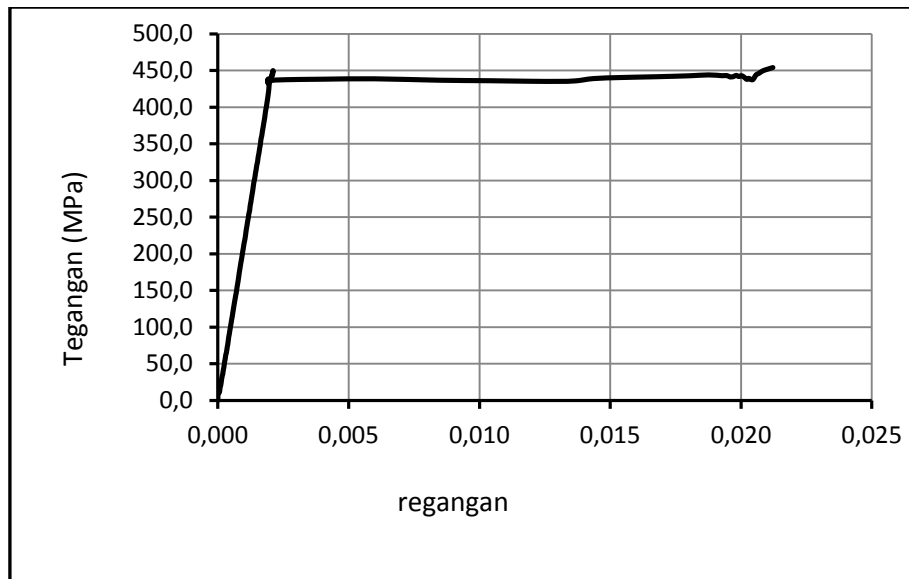
Gambar 4.1 Kurva tegangan-regangan specimen A1



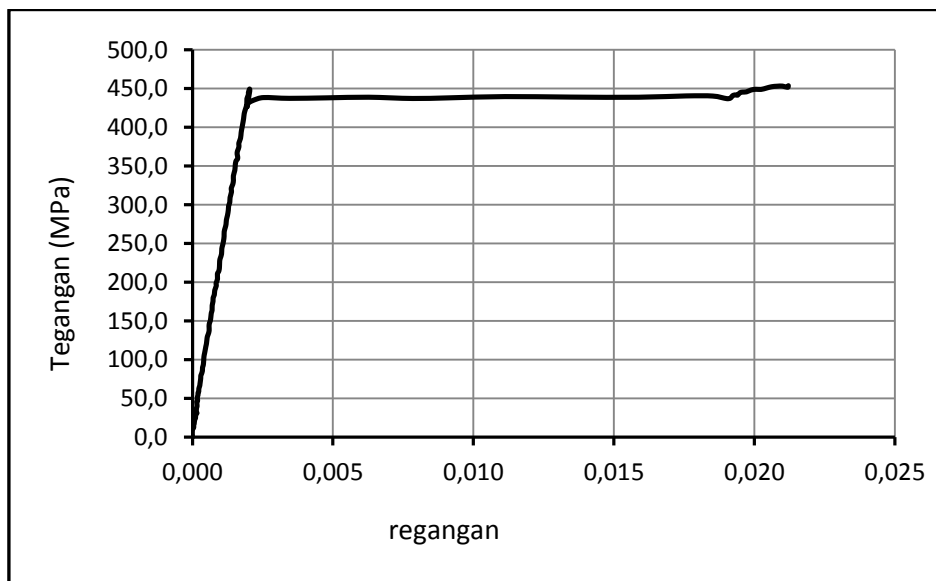
Gambar 4.2 Kurva tegangan – regangan specimen A2



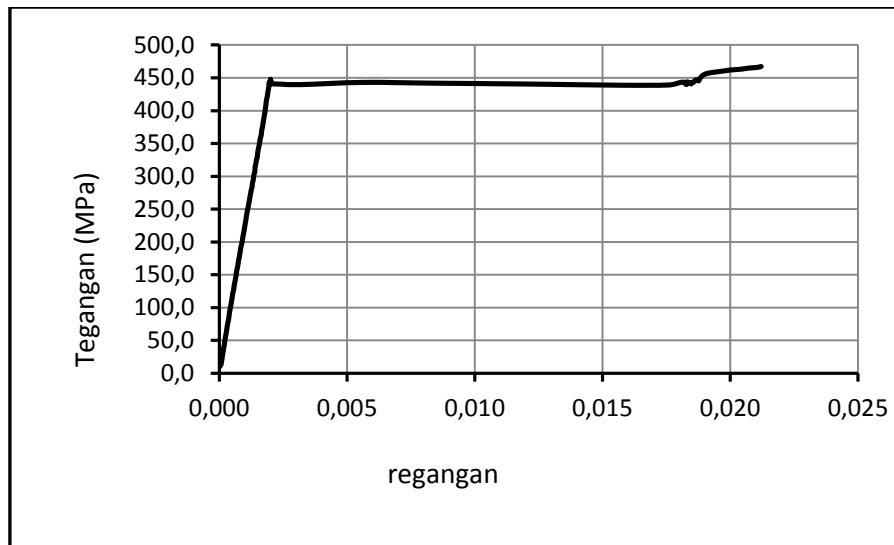
Gambar 4.3 Kurva tegangan – regangan specimen A3



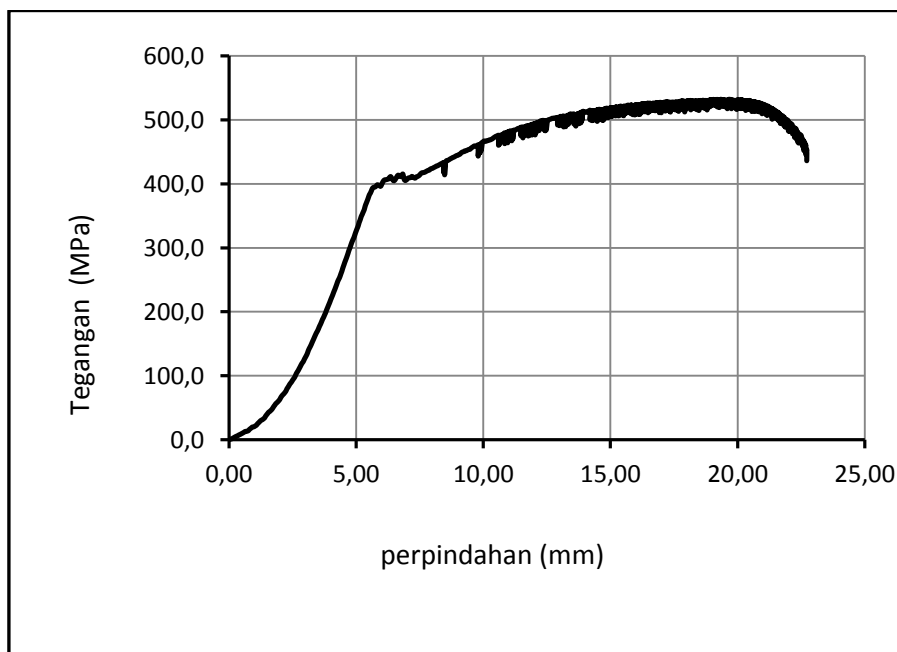
Gambar 4.4 Kurva tegangan-regangan specimen B1



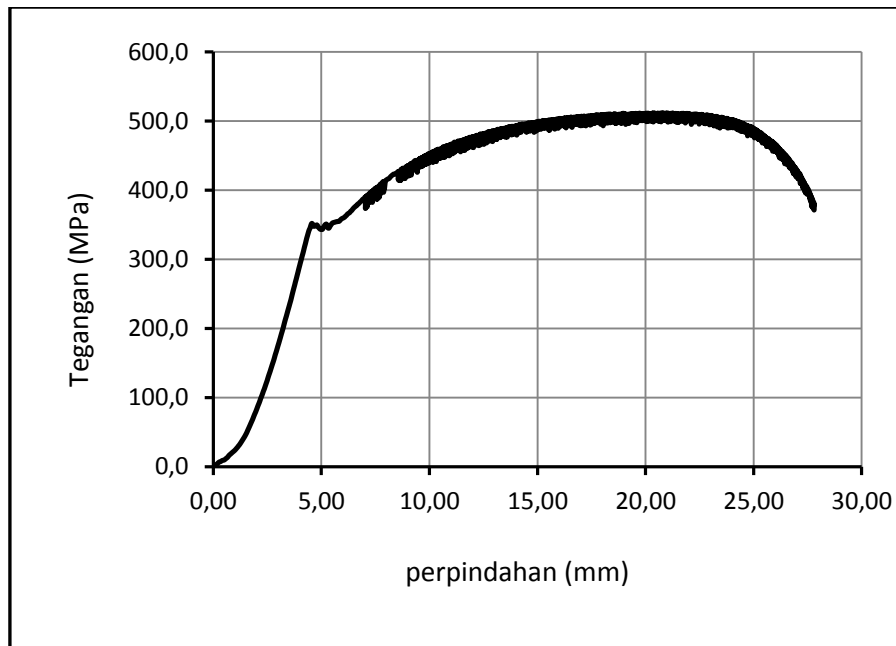
Gambar 4.5 Kurva tegangan – regangan specimen B2



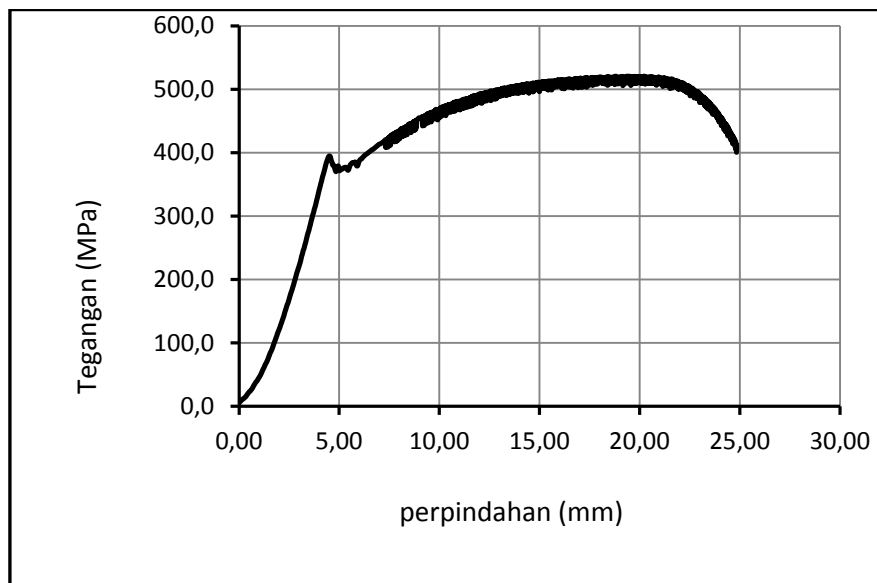
Gambar 4.6 Kurva tegangan – regangan specimen B3



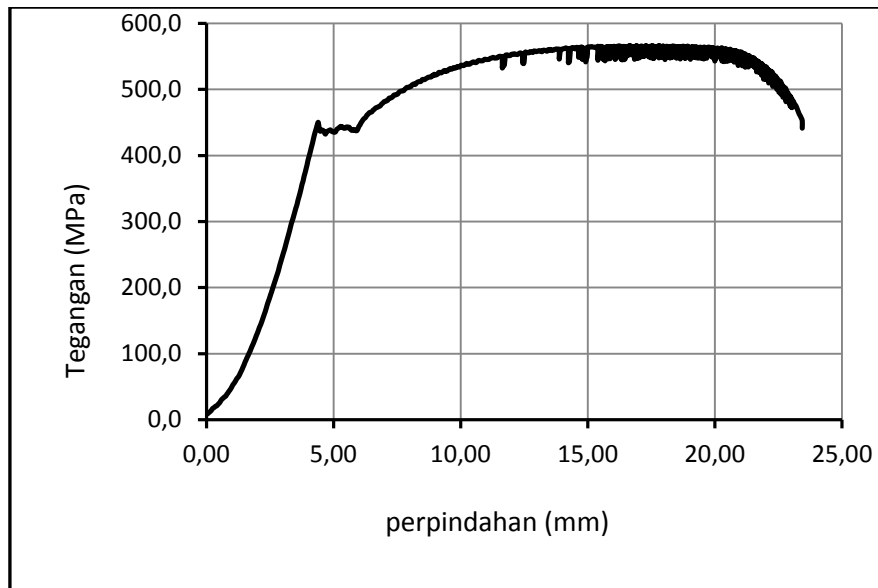
Gambar 4.7 Kurva tegangan – perpindahan specimen A1



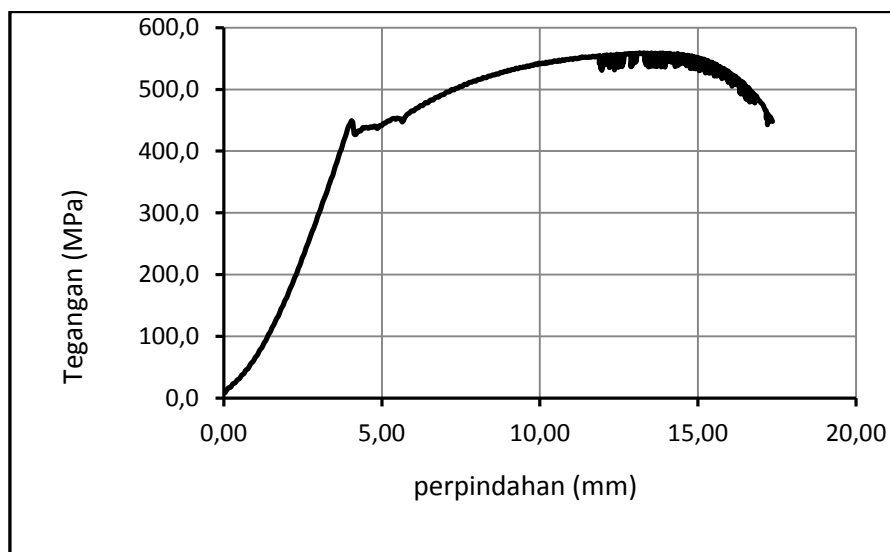
Gambar 4.8 Kurva tegangan – regangan specimen A2



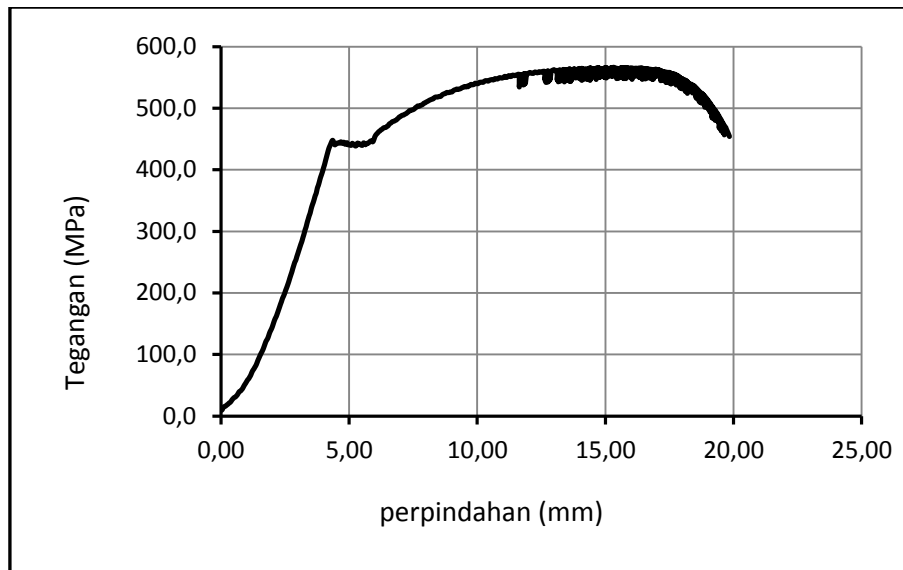
Gambar 4.9 Kurva tegangan – perpindahan specimen A3



Gambar 4.10 Kurva tegangan – perpindahan specimen B1



Gambar 4.11 Kurva tegangan – perpindahan specimen B2



Gambar 4.12 Kurva tegangan – perpindahan B3

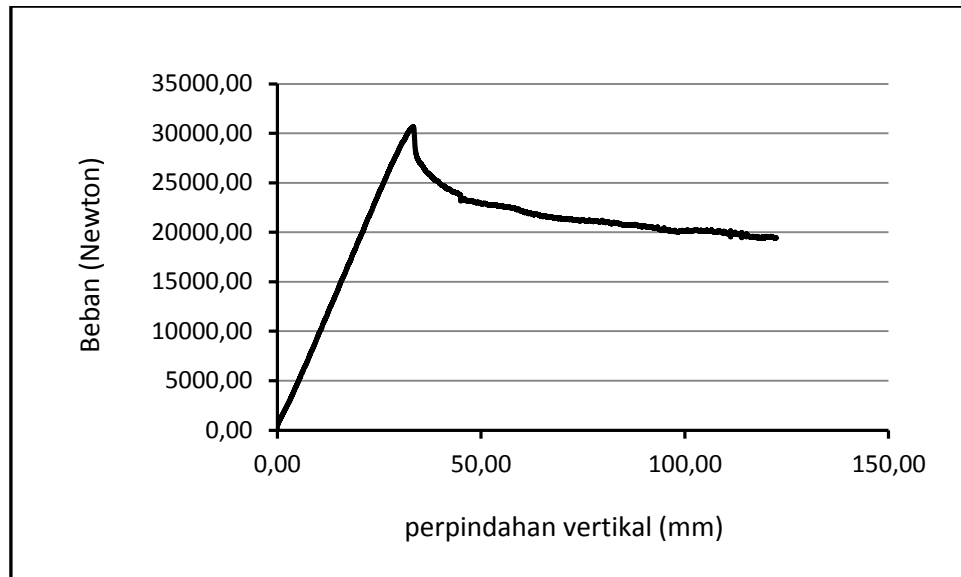
Tabel 4.1. Hasil pengujian spesimen baja

Benda Uji	Fy (MPa)	Fu (MPa)	Modulus Elastisitas
A1	400	531	172389.54
A2	320	512	213208.93
A3	370	520	197890.19
B1	430	566	224186.96
B2	430	559	204461.45
B3	420	566	213208.93
Rata-rata	395	542.33	204224.333

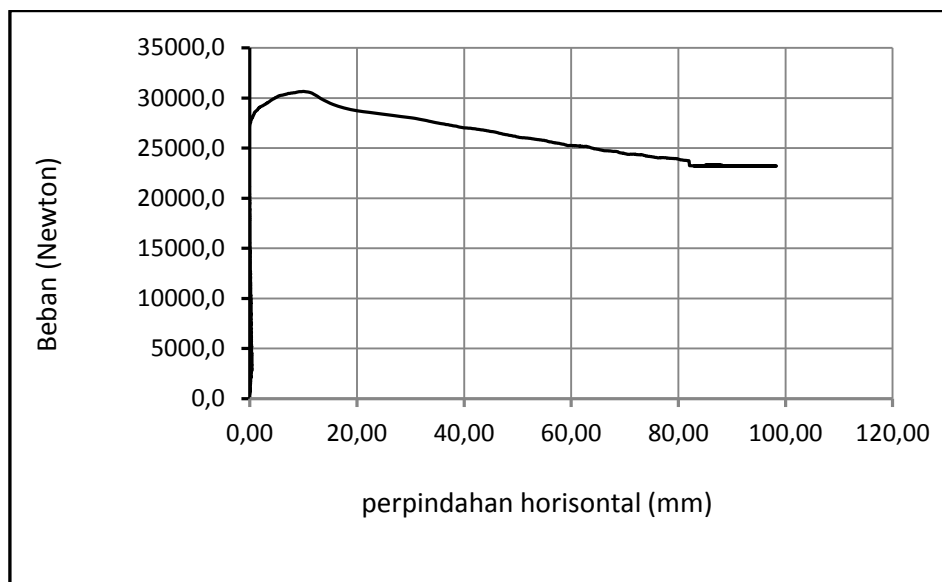
Dari hasil pengujian spesimen, didapat modulus elastisitas rata rata 204224 MPa, tegangan leleh 395 MPa dan kuat tarik 542 MPa.

4.2 Hasil pengujian benda uji

Hasil pengujian benda uji disajikan dalam Gambar 4.13 sampai dengan Gambar 4.24

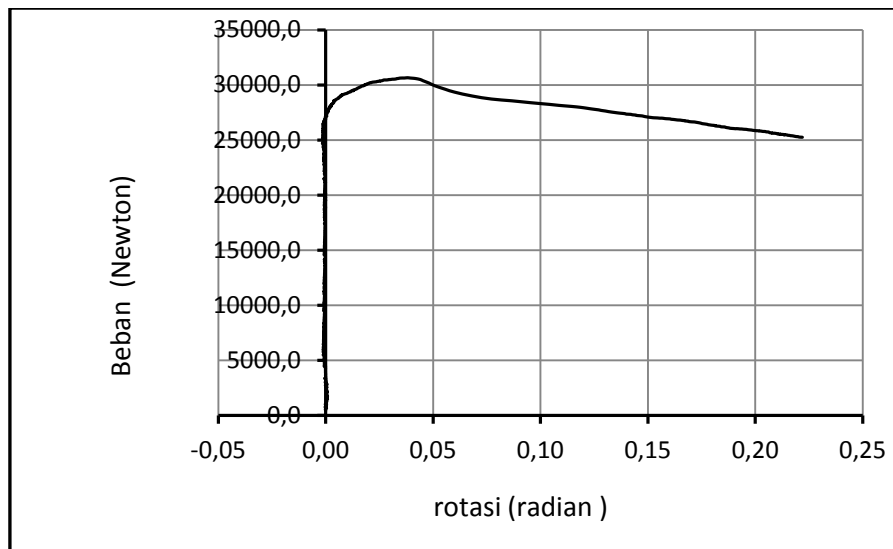


Gambar 4.13 Kurva beban – perpindahan vertical balok 3,8 meter tanpa pengaku

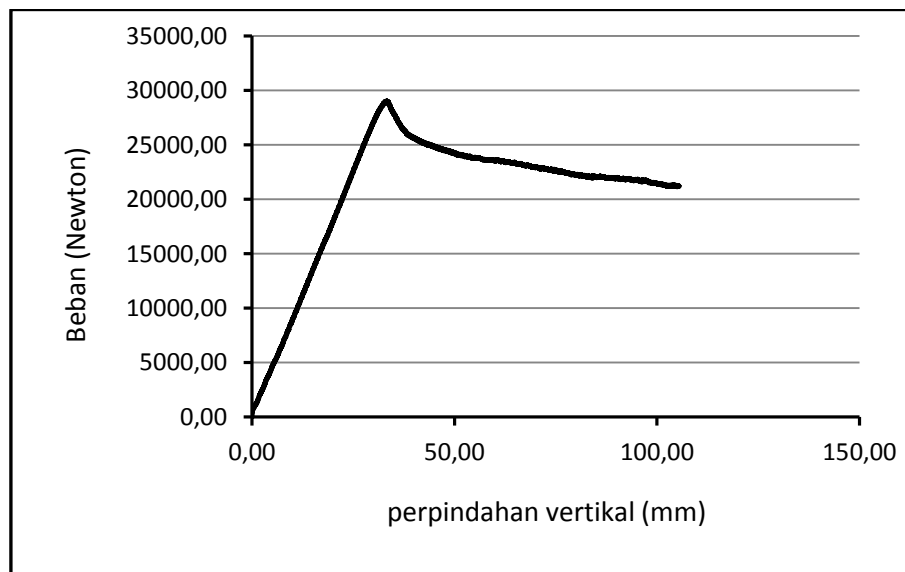


Gambar 4.14. Kurva Beban – perpindahan horizontal flens tertekan

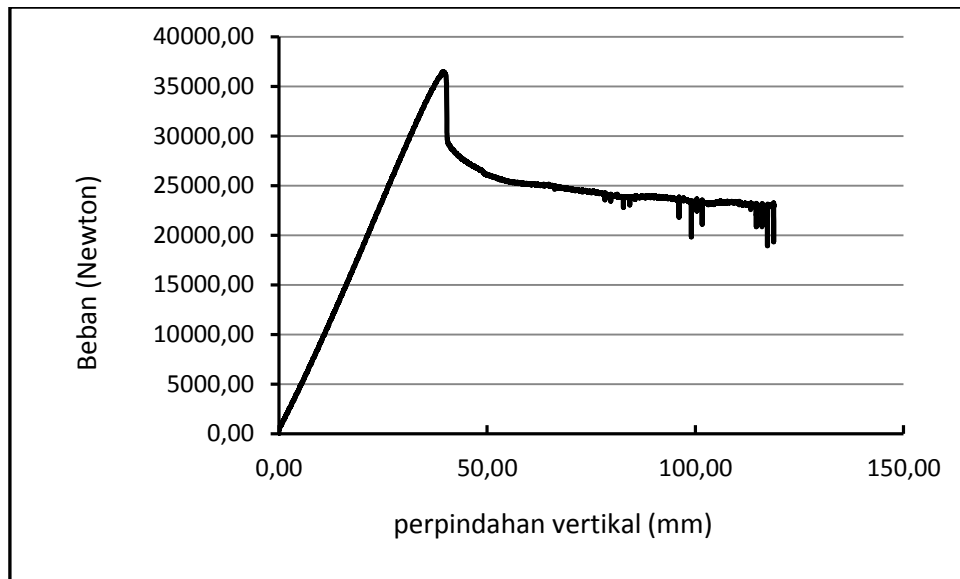
Balok 3,8 meter tanpa pengaku



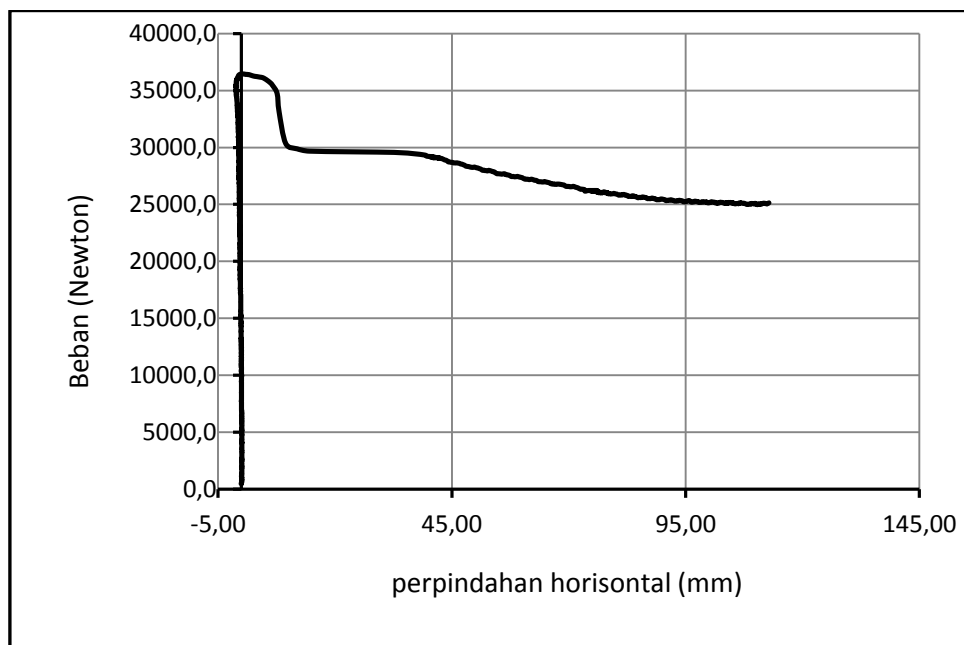
Gambar 4.15 Kurva beban – rotasi balok 3,8 meter tanpa pengaku



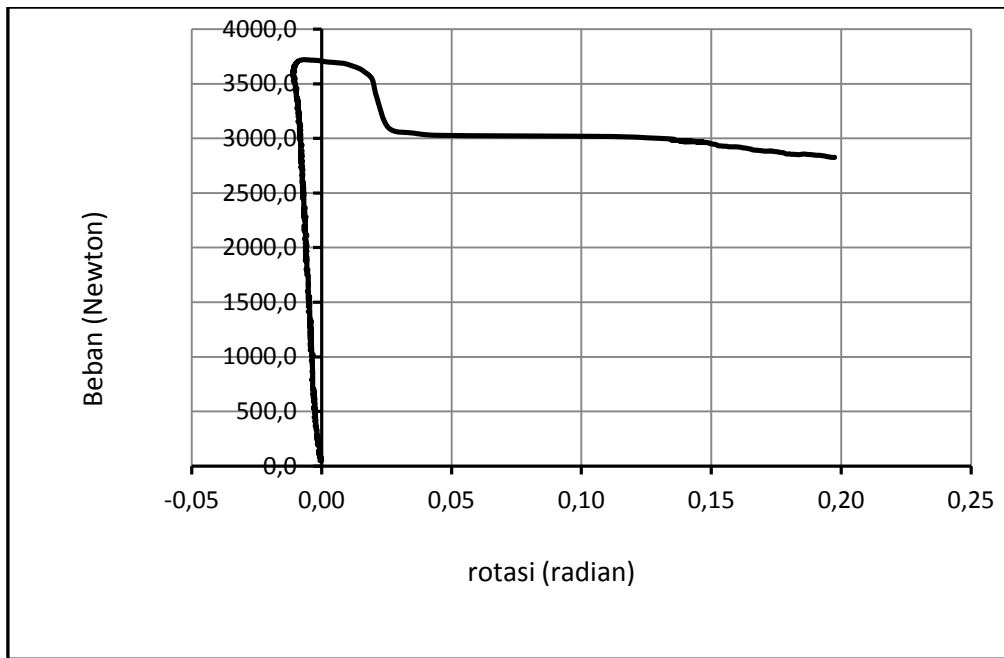
Gambar 4.16. Kurva beban – perpindahan balok 3,8 meter
berpengaku dengan kemiringan 1:1



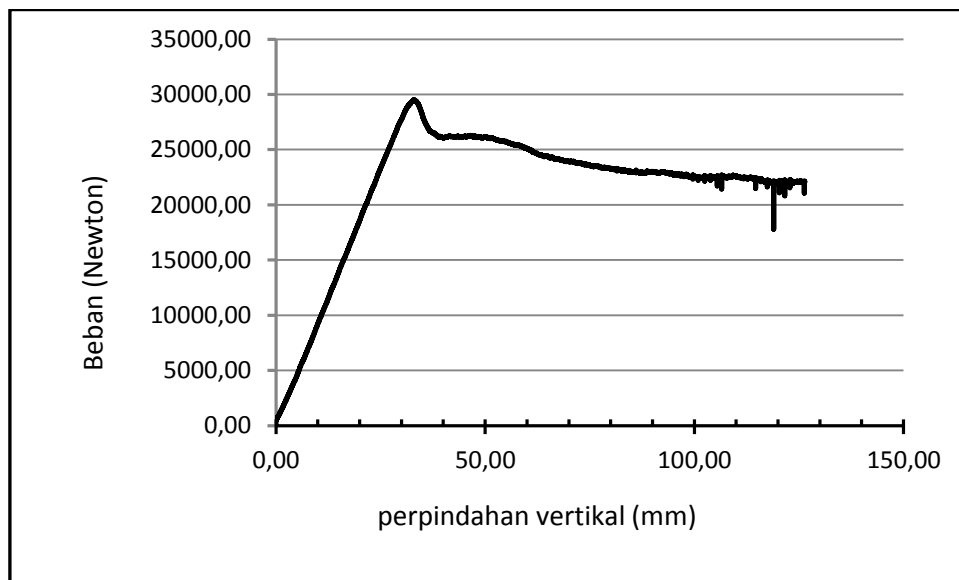
Gambar 4.17 Kurva beban – perpindahan balok 3,8 meter
berpengaku dengan kemiringan 1:2



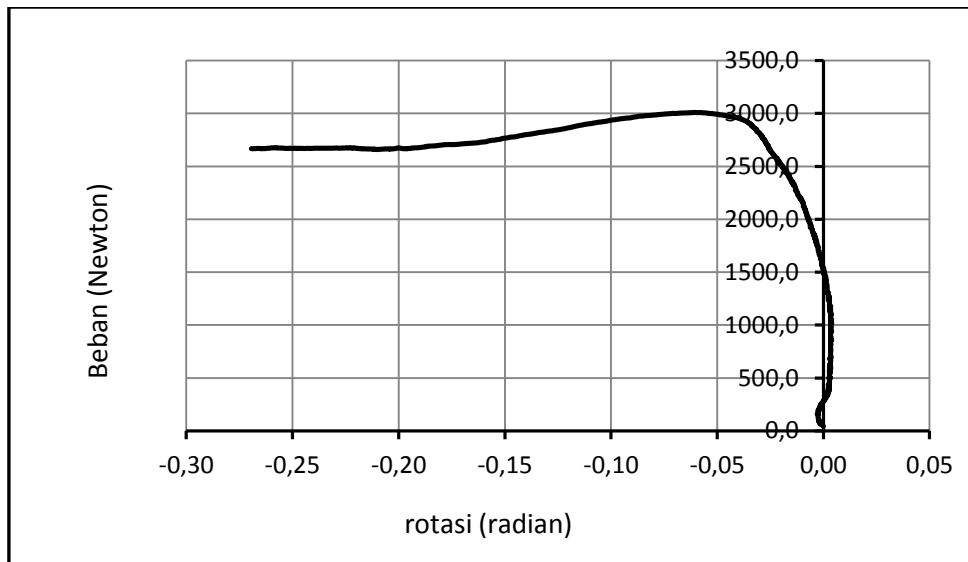
Gambar 4.18 Beban- perpindahan horizontal flens tertekan balok 3,8 meter
Dengan pengaku dengankemiringan 1:2



Gambar 4.19 Beban- rotasi balok 3,8 meter berpengaku dengan kemiringan 1:2

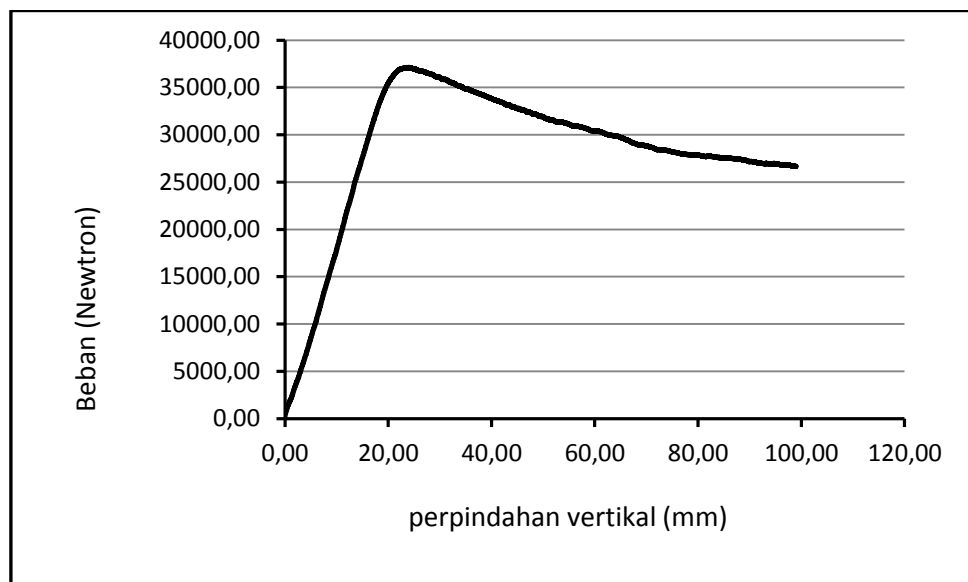


Gambar 4.20. Kurva beban-perpindahan vertikal balok 3,8 meter berpengaku dengan kemiringan 2:1

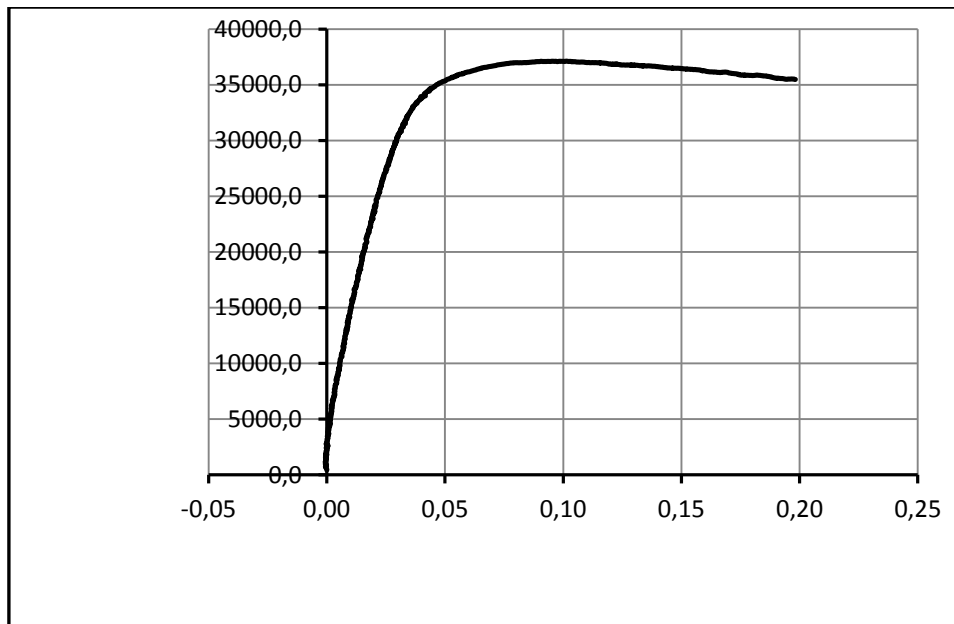


Gambar 4.21 Kurva beban-rotasi balok 3,8 meter berpengaku

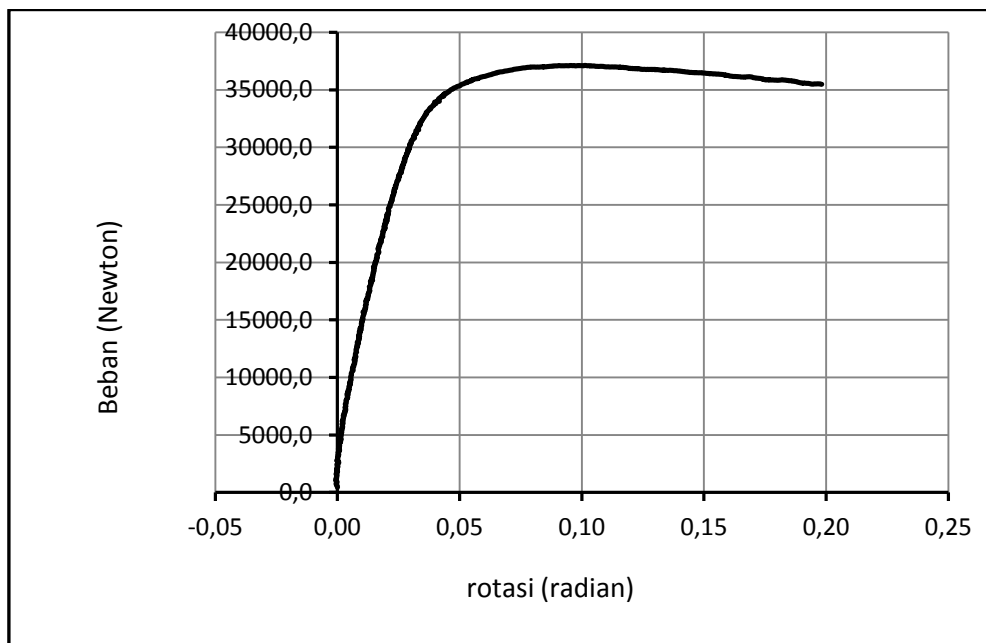
Dengan kemiringan 2:1



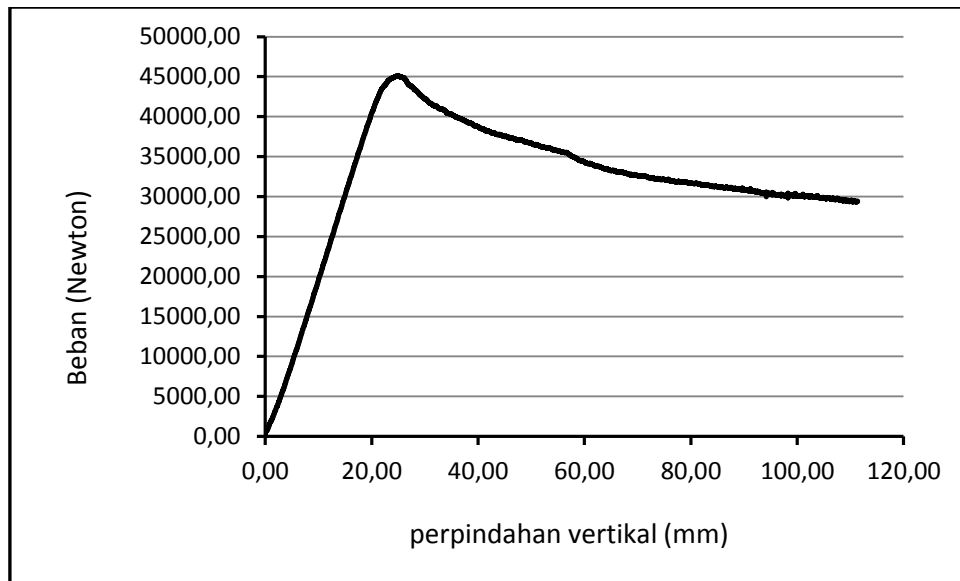
Gambar 4.22. Kurva beban-perpindahan vertikal balok 2,8 meter tanpa pengaku



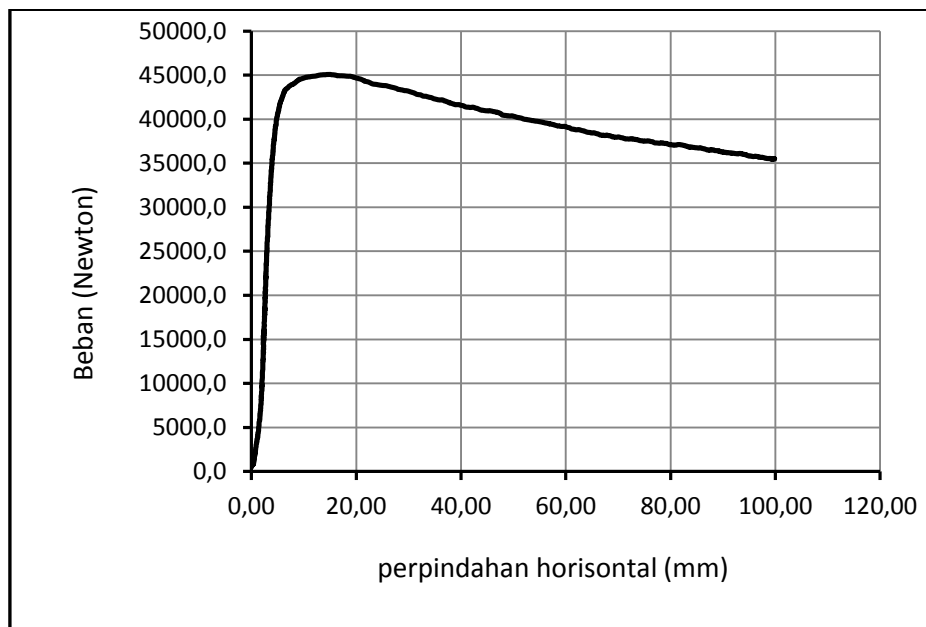
Gambar 4.23 Kurva beban perpindahan horisontal balok 2,8 meter tanpa pengaku



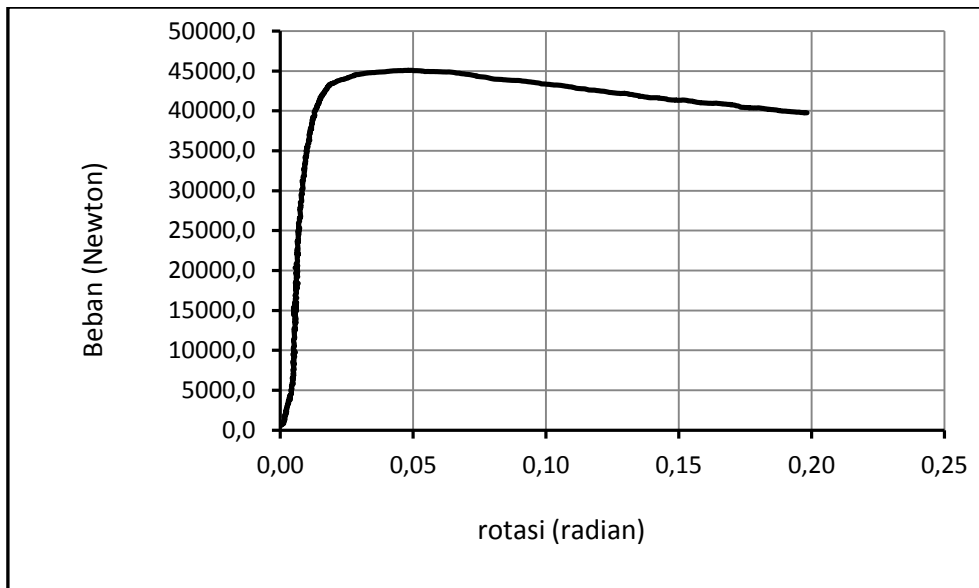
Gambar 4.24 Kurva beban-rotasi balok 2,8 meter tanpa pengaku



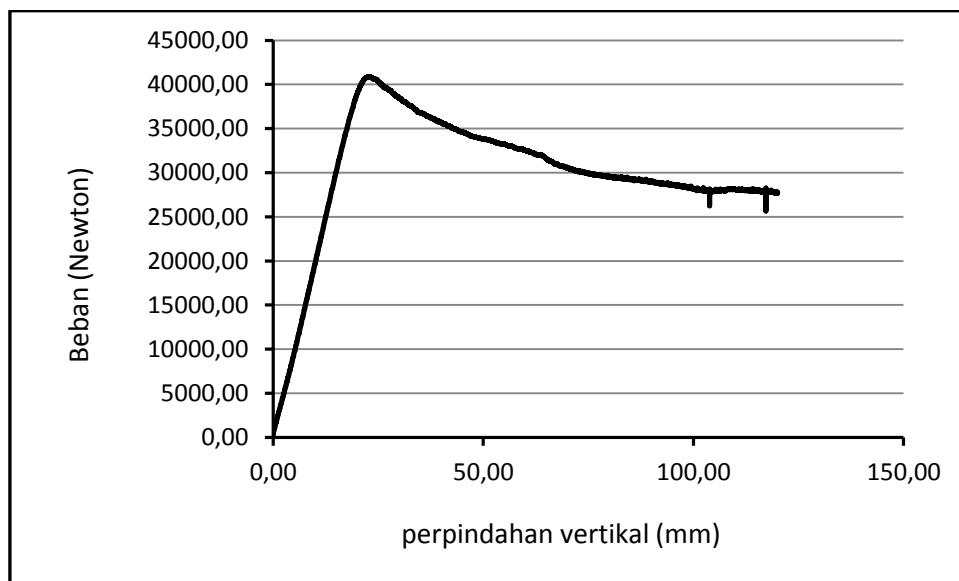
Gambar 4.25 Kurva beban-perpindahan vertikal balok 2,8 meter berpengaku
Dengan kemiringan 1:1



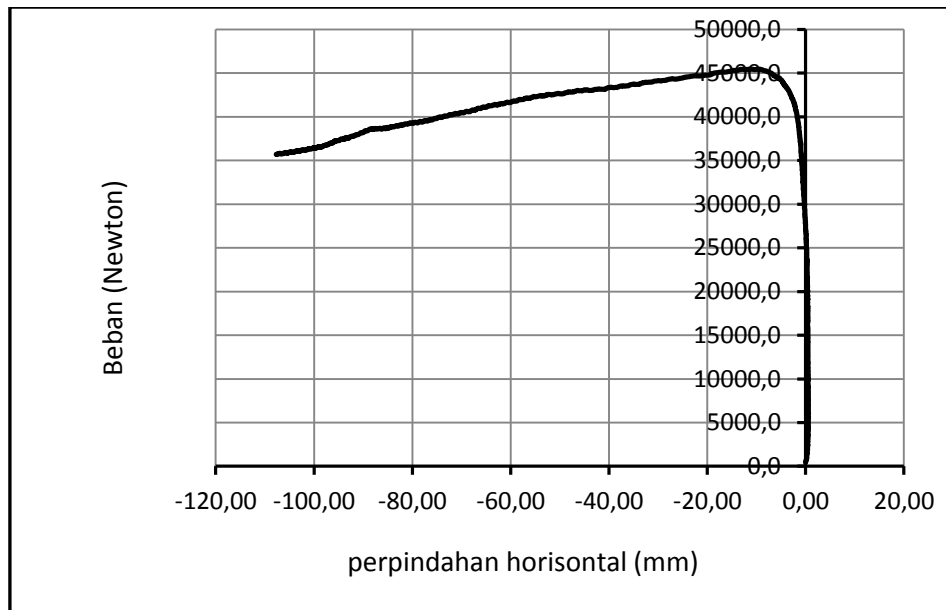
Gambar 4.26 Kurva beban - perpindahan horisontal balok 2,8 meter
Berpengaku dengan kemiringan 1:1



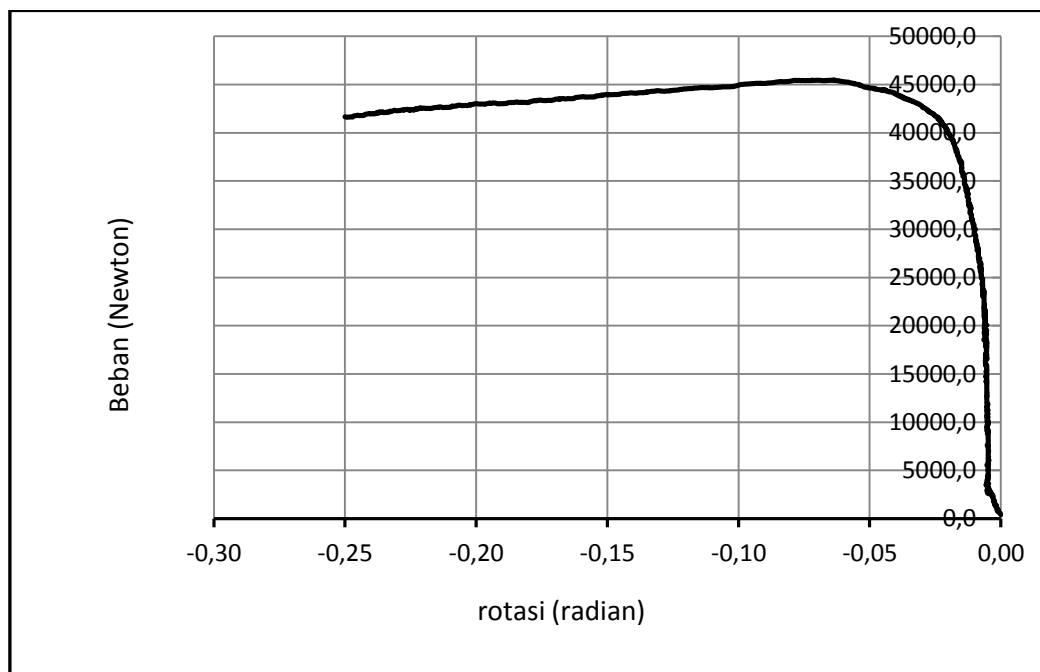
Gambar 4.27 Kurva beban-rotasi balok 2,8 meter berpengaku dengan kemiringan 1:1



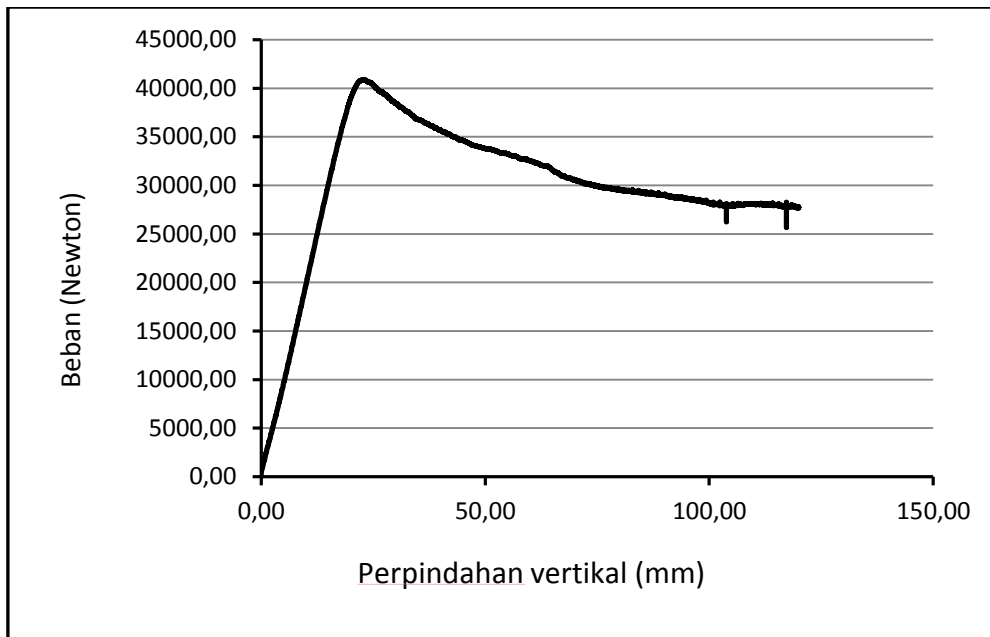
Gambar 4.28 Kurva beban-perpindahan vertikal balok 2,8 meter berpengaku dengan kemiringan 1:2



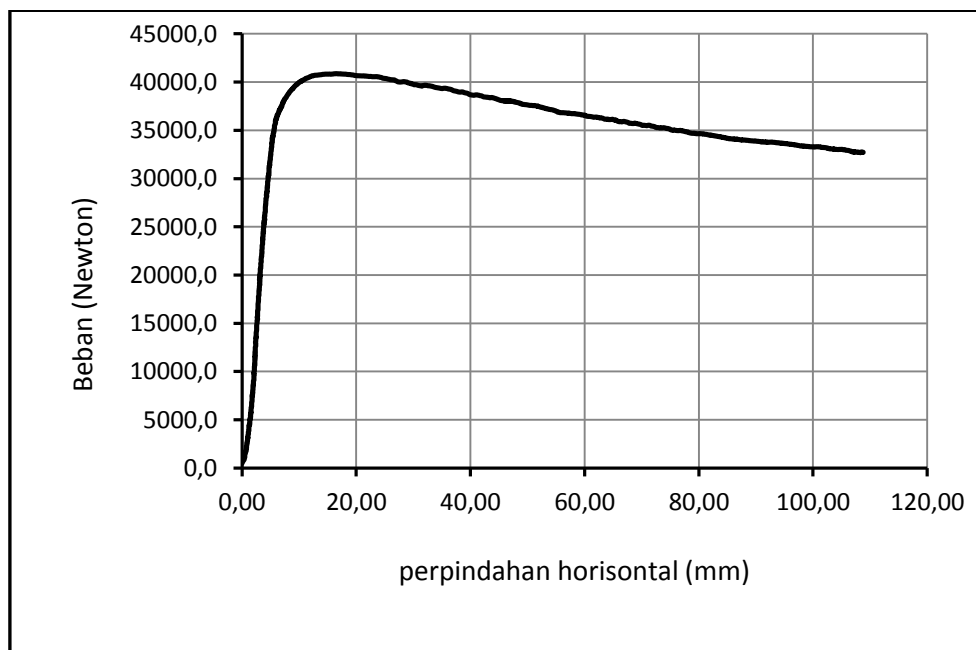
Gambar 4.29 Kurva beban-perpindahan horizontal flens tertekan
balok 2,8 meter berpengaku dengan kemiringan 1:2



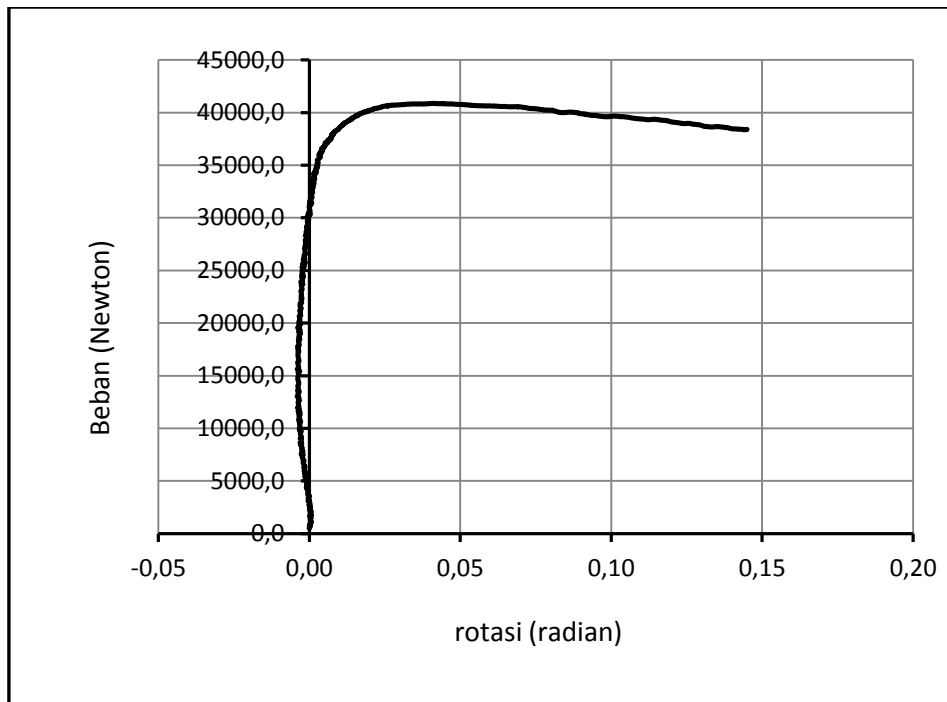
Gambar 4.30 Kurva beban-rotasi balok 2,8 meter berpengaku
Dengan kemiringan 1:2



Gambar 4.31 Kurva beban- perpindahan vertikal balok 2,8 meter
berpengaku dengan kemiringan 2:1



Gambar 4.32 Kurva beban-perpindahan vertikal balok 2,8 meter
berpengaku dengan kemiringan 2:1



Gambar 4.33 Kurva perpindahan-rotasi balok 2,8 meter berpengaku dengan kemiringan 2:1

Dari hasil pengujian balok dapat dicari beban kritis, yaitu beban puncak dari tiap grafik. Beban kritis tersebut disajikan dalam Tabel 4.2 dan Tabel 4.3. Dari grafik dapat dilihat bahwa setelah mencapai titik puncak beban mengalami penurunan cukup drastis.

TABEL 4.2 P KRITIS HASIL PENGUJIAN balok 3,8 meter

	Pcr uji	Peningkatan	Pcr SAP	Peningkatan
Tanpa pengaku	30497		27970	
Pengaku 1:1	28945	-0,05	35763	0,279
Pengaku 2:1	35344	0,159	37529	0,312
Pengaku 1:2	29488	-0,033	33895	0,212

TABEL 4.3 Pkritis Hasil Pengujian balok 2,8 meter

	Pcr uji	Peningkatan	Pcr SAP	Peningkatan
Tanpa pengaku	36809		54328	
Pengaku 1:1	43708	0,187427	74406	0,36957
Pengaku 2:1	45432	0,234263	79670	0,466463
Pengaku 1:2	40714	0,106088	69016	0,270358

Pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 disajikan pula beban kritis hasil metode elemen hingga.

Untuk balok 3,8 meter, peningkatan tidak konsisten dengan hasil metode elemen hingga. Untuk pengaku dengan kemiringan 1:1 dan 2:1, hasil pengujian menunjukkan beban kritis menurun. Maka diduga pengujian mengalami kesalahan yang belum diketahui.

Sebaliknya, untuk balok 2,8 meter, secara konsisten pengaku menimbulkan kenaikan beban kritis. Namun kenaikan tersebut tidak

BAB 5 KESIMPULAN

Dari hasil pengujian balok dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk balok dengan panjang 2,8 meter dengan pengaku miring hasil beban kritis lebih besar dari pada beban kritis hasil pengujian balok tanpa pengaku. Peningkatannya sebesar 21% sd 34%.
2. Untuk balok dengan panjang 3,8 meter hasil pengujian memberikan hasil peningkatan hanya untuk pengaku dengan kemiringan 2:1 yaitu sebesar 16%. Untuk kemiringan lain terjadi penurunan sebesar 3%-5%
3. Mengingat penurunan beban kritis untuk balok 3,8 meter tidak sesuai dengan kecenderungan untuk beban kritis hasil metode elemen hingga, diduga terjadi kesalahan pada saat pengujian.
4. Peningkatan beban kritis hasil pengujian adalah kurang lebih sebesar 50% peningkatan beban kritis hasil metode elemen hingga
5. Diantara tiga kemiringan yang diujikan, maka kemiringan 2:1 memberikan peningkatan yang paling besar yaitu sebesar 34%

DAFTAR PUSTAKA

American Institute of Steel Construction (AISC) [2010], "Specification for Structural Steel Buildings", Chicago.

Miller,B.S.,(2003), Behavior of Web Tapered Built-Up I Shapes Beams, Thesis MSc,University of Pittsburgh,School of Engineering,2003.

Park,J.S., Kang,Y.J., Lateral Buckling of Step Beams under Linear Moment Gradient, Steel Structures.2004,pp.71-81.

Raftoyiannis, I.G., Adamakos, T. Critical Lateral Torsional Buckling Moments of Steel Web Tapered I-Beams,(2010), The Open Construction and Building Technology Journal, 2010, 4, pp. 105-112,

Sapalas, P., Samofalov,M., Saraskinas, V. FEM Stability of Tapered Beam Column, Journal Of Civil Engineering and Beam Column, 2005,Vol 11 No 3, pp. 211-216,
Timoshenko, Gere, Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1963.

Takabatake,H., "Lateral Buckling Behavior of I Beams Stiffened with Stiffeners", Journal of Strucural Engineering, Vol 117 No 11 pp3203-3214.

Wijaya,P.K., "Lateral Torsional Buckling of Web Tappered I Beam", Proc-EACEF2011, Yogyakarta (2011).

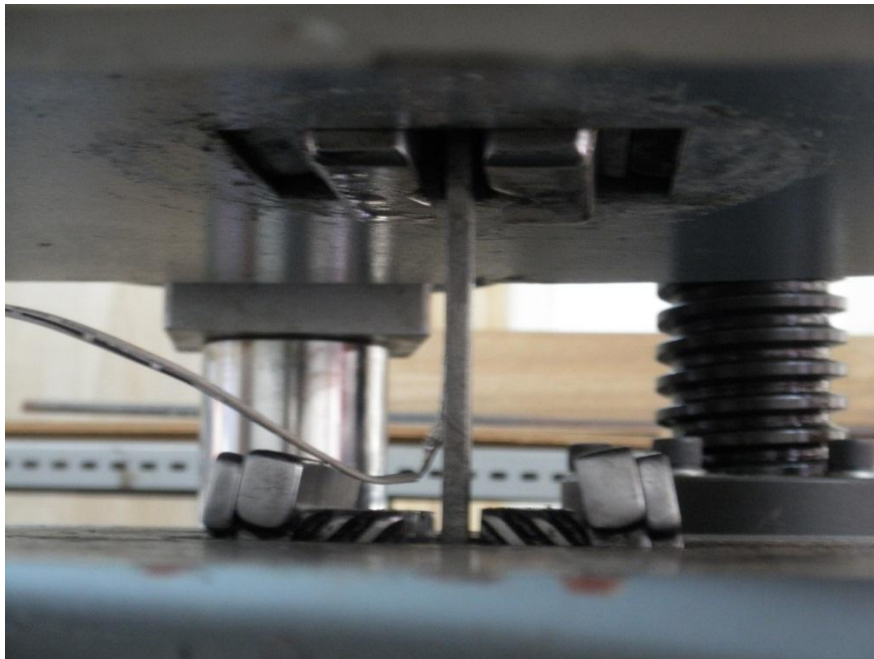
Wijaya,P.K. , "Elastic Lateral Torsional Buckling of I Beam with Lateral Support", Proc-ICCER-2012. Surabaya. (2012).

Wijaya,P.K., "Elastic Lateral Torsional Buckling Of I Beam With Stiffener parallel to Web", Proc-ICCER-2012, Surabaya (2012).

LAMPIRAN : FOTO – FOTO PENGUJIAN



Gambar L-1 Pengujian spesimen



Gambar L-2 Pengujian spesimen



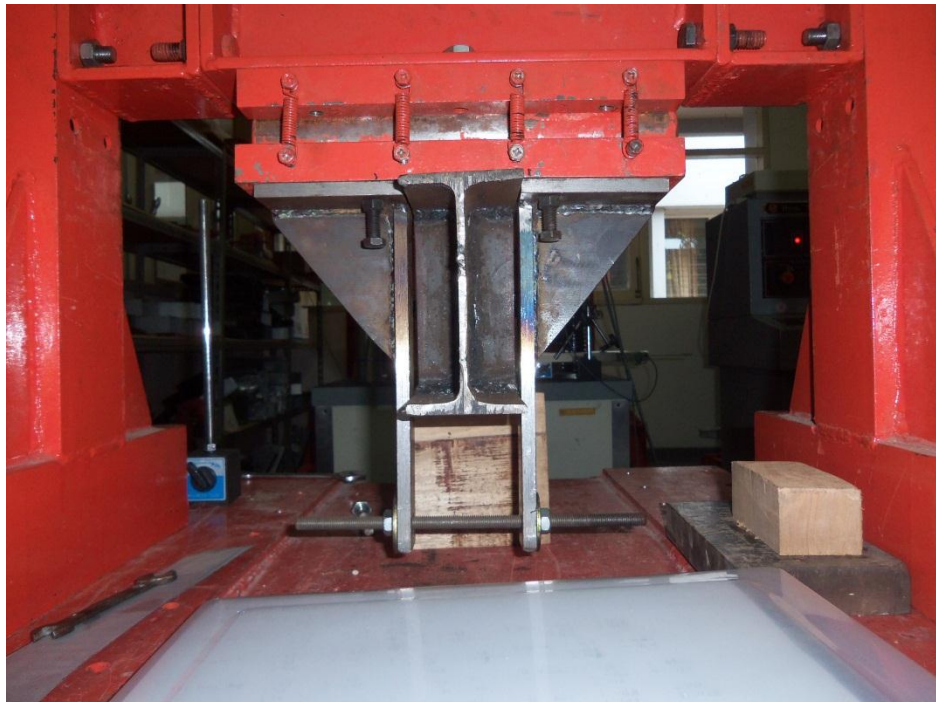
Gambar L-3 Straingage pada spesimen



Gambar L-4 spesimen yang sudah putus



Gambar L-5 Benda uji yang disiapkan



Gambar L-6 Tumpuan benda uji



Gambar L-7 Batang penggantung untuk pembebanan



Gambar L-8 Pengaku miring dengan kemiringan 1:2